

文章编号: 1008-2786-(2018)1-153-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000312

# 基于混合蛙跳算法的土地利用空间格局优化

黄强, 黄海\*, 刘学

(重庆交通大学 地理信息与国土资源系, 重庆 400074)

**摘 要:** 针对传统优化模型难以将土地利用数量结构与空间布局优化有效统一的问题, 本文提出基于混合蛙跳算法的土地利用优化模型, 以地理栅格为基本操作单元, 引入首尾排序分组、智能学习算子与变异算子改进算法, 实现土地利用空间格局优化。以重庆市渝北区 2016 年的土地利用数据对 2030 年土地利用空间格局进行优化, 优化前生态系统服务价值为  $2.012 \times 10^9$  元, 优化后为  $2.099 \times 10^9$  元, 区域经济总产出优化前为  $1.263 \times 10^{11}$  元, 优化后为  $2.148 \times 10^{11}$  元, 土地利用集约度优化前为 0.654, 优化后为 0.812, 增长幅度分别为 4.3%、70.1%、26.3%。研究表明利用混合蛙跳算法建立土地利用优化模型, 能够在多个优化目标与限制条件下, 同时进行土地利用数量与空间格局优化, 具有较强的全局寻优能力与较快的收敛速度。

**关键词:** 土地利用规划; 混合蛙跳算法; 土地利用格局优化; 重庆; 渝北区

**中图分类号:** F301.23

**文献标志码:** A

随着中国工业化与城市化的快速推进, 土地资源面临着发展与保护、供给与需求等诸多矛盾。合理的土地利用优化方案能够促进土地资源的优化配置, 长时间以来受到了诸多学者的关注, 开发了元胞自动机、多智能体系统、线性规划与模拟退火算法等多种模型<sup>[1-8]</sup>。但是, 以往的研究模型大多偏向于土地数量的优化, 相对忽视空间格局优化。怎样才能将土地利用的数量与格局优化有效统一, 将优化目标体现到具体的栅格单元是目前的一个重要研究内容, 土地利用数据中栅格单元多, 空间结构复杂, 传统数学方法并不能满足大量栅格数据的计算<sup>[9]</sup>。随着 GIS 技术的发展, 结合优化算法构建空间优化模型, 实现土地利用的数量与格局共同优化, 成为了研究热点<sup>[10]</sup>, 例如蚁群算法模拟洱海流域土地利用变化<sup>[11]</sup>, 粒子群算法构建模型实现城镇土地利用空间优化<sup>[12]</sup>, 多智能体系统实现长沙市的土地利用优化配置<sup>[13]</sup>。以上模型均有效率高, 求解能力强的特

点, 但缺乏对微观土地利用的决策过程。将空间优化算法与自下而上的模型结合, 将研究尺度缩小到栅格单元已有学者尝试, 例如多智能体与遗传算法结合实现土地利用优化配置<sup>[14]</sup>, 利用蚁群智能算法与 Agent 结合建立模型实现土地利用变化模拟与优化研究<sup>[15]</sup>。相关研究表明, 遗传算法虽然有较强的全局优化能力, 但程序实编译难度较大, 且空间搜索关联度不高; 蚁群智能算法能在旅行商问题上有良好的效果, 但是其计算量大且收敛速度较慢, 容易陷入局部最优<sup>[16]</sup>; 粒子群算法有较快逼近最优解的速度, 但是在搜索过程中种群的多样性容易丢失。每一种算法都有各自的优点和不足, 通过改进算法, 吸收它们的优点, 可以提高全局优化能力和收敛速度。

基于此, 本文提出了基于混合蛙跳算法的空间格局优化模型, 并在子种群的划分中引入了首尾排序分组, 学习策略中加入智能学习算子与变异算子, 提升算法优化搜索能力, 同时避免陷入局部最优, 加

收稿日期(Received date): 2017-06-07; 改回日期(Accepted date): 2017-11-8

基金项目(Foundation item): 重庆市教委项目(15SKG089)。[Chongqing Municipal Education Commission Project (15SKG089)]

作者简介(Biography): 黄强(1993-), 男, 重庆云阳人, 硕士生, 主要从事土地利用规划与 GIS 应用研究。[Huang Qiang (1993-), male, born in Yunyang, Chongqing, M. Sc. candidate, research on land use planning and GIS] E-mail: 1296190476@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 黄海(1972-), 男, 重庆梁平人, 博士, 副教授, 主要从事土地评价、规划与 GIS 应用研究。[Huang Hai (1972-), male, born in Liangping, Chongqing, Ph. D., associate professor, specialized in land evaluation and planning, and application of GIS] E-mail: lottery98@163.com

强空间格局的紧凑度,引导土地利用数量与格局向最优方向发展。选取重庆市渝北区为例,以  $30 \times 30$  m 的地理栅格单元为基本操作对象,以区域经济总产出、生态系统服务价值与格局紧凑度为优化目标,对混合蛙跳算法在土地利用空间格局优化方面的科学性和可行性进行验证。

## 1 土地利用空间格局优化的混合蛙跳算法模型设计

混合蛙跳算法 (Shuffled Frog Leaping Algorithm, SFLA) 作为一种新型的仿生优化算法,模拟蛙群觅食的过程,划分子种群使得个体与局部信息交流,然后多次排序分组以实现局部与全局信息交流,最终得到全局最优解<sup>[17]</sup>。该算法结合了 Memetic 算法、粒子群优化算法两者的优点,具有更快的收敛速度,更强的全局寻优能力。混合蛙跳算法已被广泛应用于众多领域中,如管网分配、梯级水库群调度、电力系统频率估计、分布式发电调度、瞬态传热等不同学科不同方向的优化问题<sup>[18-22]</sup>。

### 1.1 优化思路

采用实数编码代替土地利用类型,而青蛙个体实际上是对土地利用图的矩形分割,分割尺度由种群规模控制,分割后形成小块的土地利用图,表现形式为由编码构成的二维矩阵,所以在种群中每一个

青蛙都代表了一种土地利用配置方案。通过适应度函数找寻最优青蛙个体,也意味找寻最优土地利用配置方案,通过不断的排序分组并在组内向最优方案学习,从而提升整个种群的质量,实现空间格局的优化<sup>[23]</sup>。

具体的优化思路如图 1 所示,包括全局与组内两部分。其中  $P_g$  为全局适应度值最高的青蛙个体,  $P_w$  与  $P_b$  分别为每组中的适应度值最差与最好的青蛙个体,  $P_{wn}$  为经过学习操作后的青蛙个体。

### 1.2 模型设计

#### 1.2.1 适应度函数

经济效益目标函数:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^7 F_{ij}^k X_{ij}^k \quad (1)$$

其中:  $F$  为区域土地利用经济总产出,单元为元;  $X_{ij}^k$  为一个两元变量,当栅格单元  $(i, j)$  的土地利用类型为  $k$  时,  $X_{ij}^k$  的值为 1 否则为 0<sup>[24]</sup>。  $F_{ij}^k$  为栅格单元  $(i, j)$  的土地利用类型为  $k$  的国内平均生产总值,利用灰色预测、回归预测、趋势预测等多种方法求得<sup>[25]</sup>。

土地利用集约度函数:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m b_i w_i \quad (2)$$

土地利用集约度的计算采用综合因素评价法,其中  $S$  为土地利用集约程度值,  $b_i$  为研究区域的第  $i$  项评价指标,  $w_i$  为权重系数;评价指标包括人口密度、土地农业利用率、人均建设用地、交通用地比重、

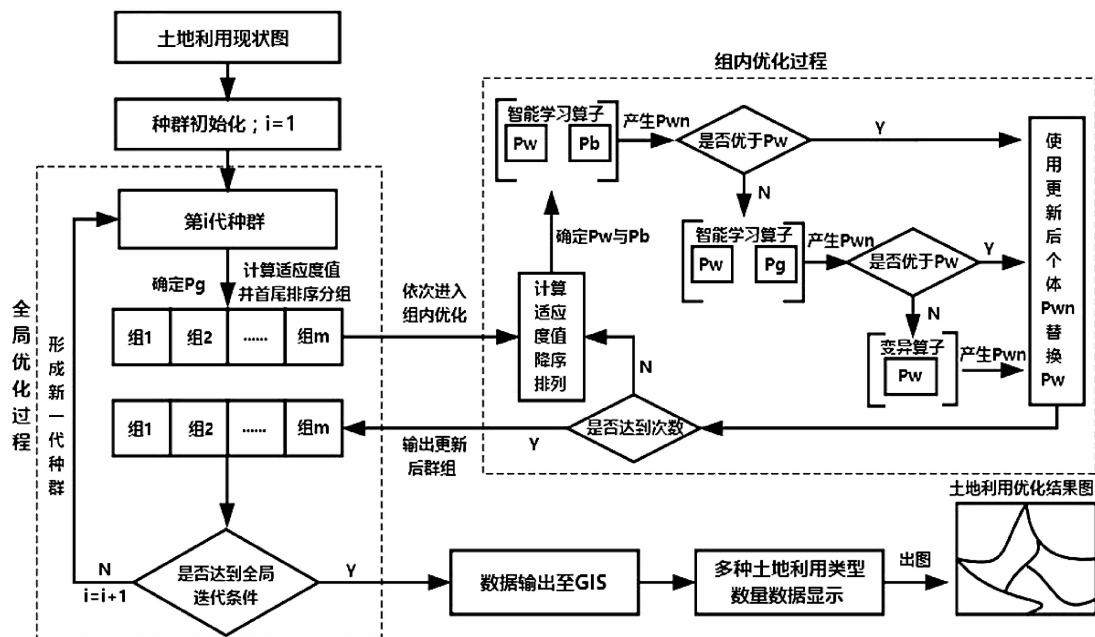


图 1 土地利用空间优化 SFLA 思路

Fig. 1 Flow chart of SFLA for land use spatial optimization

地均 GDP、绿地覆盖率与人均绿地面积;权重系数则采用均方差法确定<sup>[26]</sup>。

生态效益目标函数:

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^7 S_{ij}^k X_{ij}^k \quad (3)$$

其中: $E$  为区域生态系统服务价值,单元为元; $S_{ij}^k$  为栅格单元 $(i,j)$ 的土地利用类型为 $k$ 的生态系统服务价值<sup>[27]</sup>。

### 1.2.2 约束条件

考虑到模型中以栅格单元为基本操作对象,同时为了保证结果的合理性与政策上的可行性,所以约束条件包括数量、结构约束和地类转换规则。

#### 1) 数量、结构约束

土地总面积约束,研究区总栅格数不允许发生变化。行政边界完整性,区域外用地不允许纳入何计算。河流边界完整性,不允许水域转换为其他用地类型且不允许产生新的水域。

#### 2) 地类转换规则

耕地保护,处于基本农田保护区的耕地不允许转换为其他用地类型。未利用地开发约束,已开发土地不能转换为未利用地。建设用地集约发展约束,只有建设用地周围的生态用地以及未利用地能够转换为建设用地。城市边界与生态保护,已有的建设用地与林地不得发生变化。

## 1.3 算法设计

### 1.3.1 利用元胞数组实现种群初始化

元胞数组是 Matlab 中独有的一种数据类型,是数组结构的一种,元胞内部能够容纳不同的数据信息,可以将土地利用数据分块封装。用单个元胞作为青蛙个体并容纳土地利用数字信息,以多个元胞所组成数组作为初始种群。对元胞数组的排序分组也就是对种群的排序分组,同时也可以访问并改变元胞的内部信息以实现青蛙个体的进化。

### 1.3.2 首尾排序分组

将所有个体按适应度降序排列,每次从该列的首尾取出两个个体,划分到同一个小组,直到完成所有小组分配,实现首尾排序分组。这样能让组间差距缩小,组内差距加大。促进较差个体所代表的土地利用配置方案,向全局较优方案学习,从而实现土地利用格局优化。

### 1.3.3 智能学习算子

以往的研究中,学习策略部分大多数采用随机替换学习算子,既无法保证每次更新都会比以前更优,也会加大空间格局的破碎程度。智能学习算子在设定好的约束条件下。先于学习目标青蛙  $P$  中,

合理的选择一个小的栅格区域作为学习片段,判断该学习片段所包含最多的土地利用类型,然后在组内最差青蛙  $P_w$  中找寻对应土地利用类型的周边位置,最后让学习片段去替换该周边位置,完成更新操作并输出学习后的青蛙个体  $P_{wn}$ ,既能保证每次更新都符合要求,同时也能保证空间格局更加紧凑。

### 1.3.4 变异算子

变异算子能够让算法跳出局部最优与死循环,当再次更新后的个体没有比以前的个体要好时,就在中随机选中一个栅格单元进行变异操作,为了不让斑块过度破碎,变异后的土地利用类型是其临近的八个栅格单元中出现次数最多的土地利用类型。

## 2 实例验证

### 2.1 研究区域与数据处理

渝北区是重庆主城区之一,位于重庆市西北部,地理坐标  $106^{\circ}27'30'' \sim 106^{\circ}57'58''E$ 、 $29^{\circ}34'45'' \sim 30^{\circ}07'22''N$ ,土地面积  $1452.03 \text{ km}^2$ ,常住人口 160.25 万人,属亚热带湿润气候区,四季分明,雨量充沛,无霜期长。年平均气温  $17.3^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量  $1100 \text{ mm}$ ,年日照时数  $1340 \text{ h}$ <sup>[28]</sup>。

采用渝北区 2016 年 6 月 landsat8 号卫星数据,无云,质量良好。利用 Envi5.1 软件进行辐射校正、大气校正与拼接裁剪等预处理工作后,进行监督分类,将研究区域土地利用类型分成建筑用地、园地、林地、草地、耕地、水域以及未利用地 7 类,2016 年 6 月土地利用现状如图 2 所示。用  $30 \times 30 \text{ m}$  的地理栅格表示,共  $2141 \times 1810$  个栅格单元,不在研究区的栅格单元用 0 表示。利用 ArcGIS 将得到的分类结果转换为 ASCII 格式的数字信息,并输入至编译程序进行计算。

### 2.2 算法实现

基于 SFLA 算法的空间格局优化模型以 Matlab2016b 作为编译软件,采用交互式 GUI 界面,生成可执行 exe 文件。种群构成决定着青蛙个体所包含的土地利用信息量,个体的信息量过大会导致优化不彻底,过小则会加大运算量,通过反复迭代,观察最优结果,最终确定群组数  $m = 60$ ,组内个体  $n = 18$ ,种群规模  $P = m \cdot n = 1080$ 。模拟时间与迭代次数成正比关系,随着迭代次数的增加算法的寻优速度会减弱,每次迭代对土地利用数据所造成的实际影响不是稳定值,所以时间步长对应的全局迭代次数为 4 至 10 次,经过多次迭代分析最终确定组

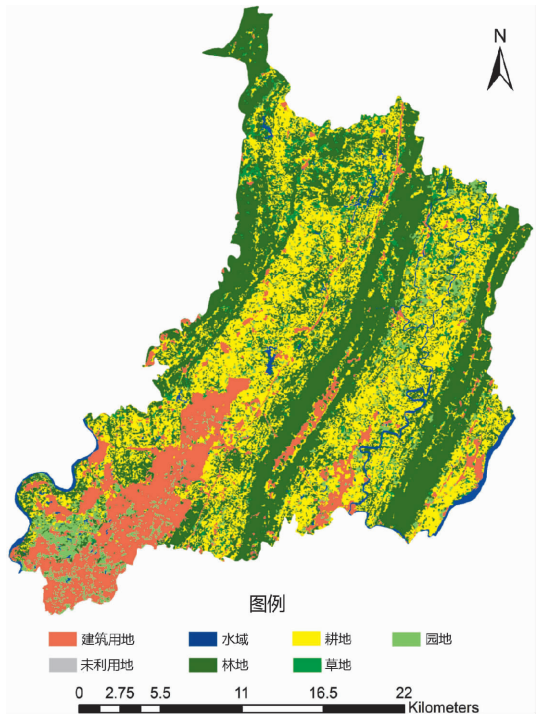


图 2 土地利用现状图(2016 年 6 月)

Fig. 2 Actual land use of study area in June 2016

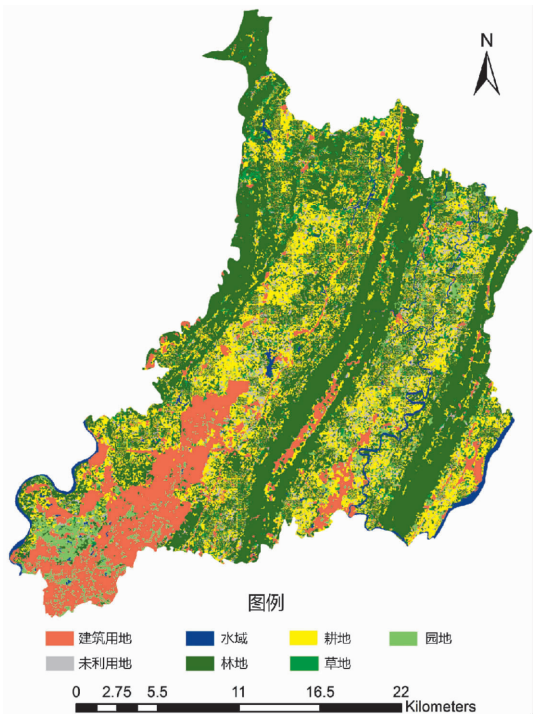


图 4 土地利用空间格局优化图(2030 年)

Fig. 4 Optimal land use of study area in 2030

内迭代次数  $I_{\max} = 10$ , 全局迭代次数  $G_{\max} = 100$  时, 时间步长为 15 年<sup>[29-30]</sup>。具体运行界面如图 3, 结果输入至 ArcGIS 后得到优化结果如图 4 所示(以 2030 年为目标年)。

2.3 结果分析

将优化前后的土地利用空间格局图进行叠加分析后发现:新增用地大多是在原有基础上展开的,生态用地更加聚集,由山脉向中部延伸,城市边界也未被破坏。经过优化后的生态系统服务价值由 2016 年的  $2.012 \times 10^9$  元增长到  $2.099 \times 10^9$  元。区域经济总产出由  $1.263 \times 10^{11}$  元增加到  $2.148 \times 10^{11}$  元。土地利用集约程度值由 2016 年的 0.654 增长到

0.812。增长幅度分别为 4.3%、70.1%、26.3%, 可以认为优化模型是有效的。

根据对优化结果的统计,得到土地利用结构变化如表 1。耕地与未利用地的数量有所减少,水域保持不变,建筑用地与其他生态用地的数量得到增加。根据研究区域的规划指标,耕地保有量与建设用地规模均符合要求。

表 1 土地利用结构变化表

Tab. 1 Changes of land use quantitative structure

地类	2016 年		优化结果		变化面积 /hm <sup>2</sup>
	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	
建筑用地	20066.49	12.70	21928.86	13.76	1862.37
水域	2880.63	1.98	2880.63	1.98	0
园地	6749.91	4.63	6788.79	5.28	38.88
林地	59332.41	40.70	64994.13	46.19	5661.72
耕地	41525.01	28.48	34823.61	24.44	-6701.4
草地	7497.36	5.14	7845.21	5.27	347.85
未利用地	7743.69	5.31	6534.27	4.14	-1209.42

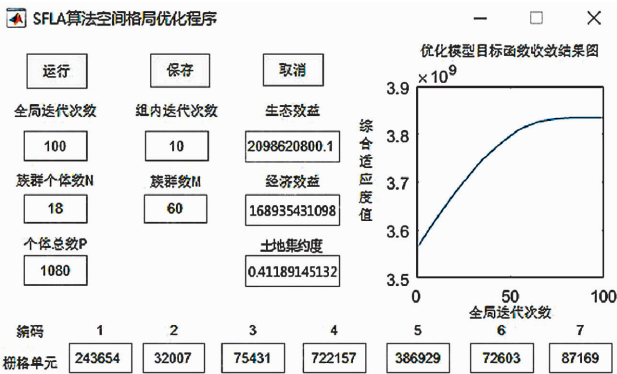


图 3 土地利用空间优化 SFLA 模型程序运行界面图

Fig. 3 SFLA model optimization program

土地利用转换矩阵如表 2。优化过程中约 6.47% (9430.47 hm<sup>2</sup>) 栅格单元进行了重新分配,发生转移的用地类型主要为耕地、未利用地与草地,分别占总转化量的 71.06% (6701.4 hm<sup>2</sup>)、12.82%

(1209.42 hm<sup>2</sup>) 与 10.8% (1018.89 hm<sup>2</sup>), 建筑用地、水域与林地没有发生转化。具体来看, 约 16.14% 的耕地发生了转化, 其中 58.16% 因为退耕还林政策调整为林地, 18.99% 因为城市扩张调整为

建筑用地, 剩余的 22.85% 因为生态结构调整而转化为草地与园地。未利用地的开发得到进一步加强, 草地等生态用地的内部结构有所调整但总量上升。

表 2 土地利用转换矩阵  
Tab. 2 Land use transition matrix

土地类型	优化结果(面积/hm <sup>2</sup> )							总计 (面积/hm <sup>2</sup> )	转换率 /%
	建筑用地	水域	园地	林地	耕地	草地	未利用地		
建筑用地	—	0	0	0	0	0	0	0	0.00
水域	0	—	0	0	0	0	0	0	0.00
园地	121.77	0	—	360.63	0	18.36	0	500.76	7.42
林地	0	0	0	—	0	0	0	0	0.00
耕地	1272.56	0	389.16	3897.56	—	1133.19	0	6701.4	16.14
草地	257.76	0	73.08	688.05	0	—	0	1018.89	13.59
未利用地	210.33	0	68.4	715.5	0	215.19	—	1209.42	15.62
总计	1862.37	0	539.64	5661.72	0	1366.74	0	9430.47	6.47

土地利用转化分布如图 5, 图中展示了耕地、草地与未利用地的转化分布, 占总转化量的 94.68%。

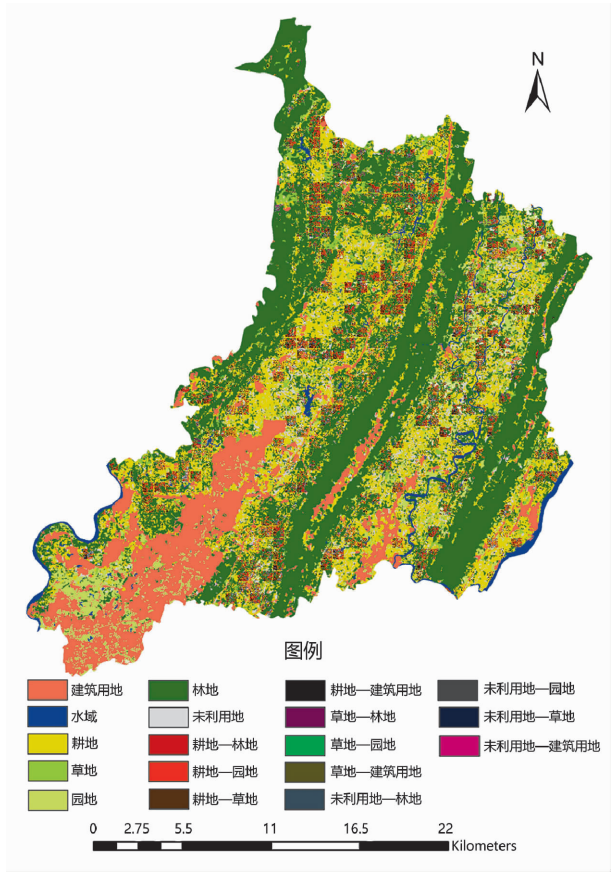


图 5 土地利用转化分布图  
Fig. 5 Distribution of land use conversion

渝北区北部以及靠近三条山脉的区域属于政府划定的生态保护区, 该区域中耕地夹杂在大片的林地与草地中, 不利于农业管理与生态保护, 大多数被调整为林地与草地, 同区域也有分布较为分散的草地转化为林地。渝北区中部属于农业区, 该区域中较为集中的大片耕地受到保护, 而没有发生转化。在渝北区的南部属于城市核心区, 靠近城市的边缘区域有部分零星的建设用地, 间隔其中的耕地、草地与未利用地被转化为建设用地, 以促进建设用地的集约发展。该转化发布图符合渝北区已发布的相关规划, 同时符合算法的设定, 找寻土地利用配置不合理的区域并对其进行优化, 促进了土地利用的可持续发展。

为了进一步检验算法, 分别用粒子群算法 (POS) 与混合蛙跳算法 (SFLA) 对渝北区 2016 年土地利用结构进行空间优化, 并对综合适应度值进行极差标准化, 结果如图 6。两者在迭代初期寻优速度均较快, 但是在迭代次数 50 次以后, 寻优速度均明显减慢。POS 算法在迭代初期的寻优速度明显高于 SFLA 算法, 但在 25 次以后 SFLA 的寻优能力明显增加, 并在 100 次后已趋于收敛。POS 算法在 100 次后虽然也有收敛趋势, 但优化后的结果不如 SFLA。所以 SFLA 算法收敛速度快且精度高, 能够在较短时间内获得最优解。



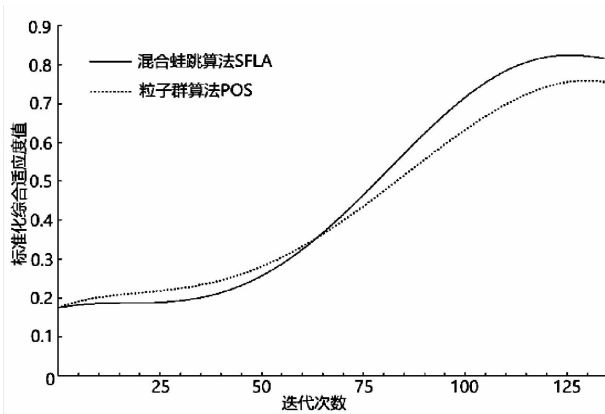


图6 SFLA 与 PSO 的综合适应度值随迭代次数变化的对比

Fig. 6 Comparison of variation in fitness values for SFLA and POS during iterations

### 3 结论与讨论

本文利用混合蛙跳算法建立土地利用优化模型,以区域经济总产出、生态系统服务价值与格局紧凑度为目标函数,并引入首尾排序分组、智能学习算子与变异算子以改进原有算法,对重庆市渝北区2030年的土地利用格局进行优化。优化结果表明,改进后的蛙跳算法能够深化青蛙个体在组群间的交流,扩大寻优范围,加快收敛速度,在较短时间内得到最优解。在实现土地利用数量与布局的优化过程中,提高了经济与生态效益,同时促进用地类型的集约化布局。其中耕地不仅满足发展红线的要求,且基本农田也得到了应有的保护,新增建筑用地得到了合理部署,城市的绿化面积得到了提高,林地的扩张也能够有效的保护生态环境。最终优化结果在多个目标与限制条件的情况下,平衡了来自各方的利益。

虽然研究结果表明了混合蛙跳算法在土地利用优化问题上的优势,但是算法中操作栅格单元过多,且多次的分组排序还掺杂着小区域栅格单元改变,时间与空间复杂度高。对于算法整体采用向量化处理,与基于多处理器的并行编程,将会是下一步研究方向。

### 参考文献 (References)

- [1] YANG X, ZHENG X Q, LV L N. A spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata [J]. Ecological Modelling, 2012, **233**(2):11-19
- [2] ARSANJANI J C, KAINZ W, MOUSIVAND A J. Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov chain based on cellular automata: the case of Tehran [J]. International Journal of Image & Data Fusion, 2011, **2**(4):329-345
- [3] PARKER D C, MANSON S M, JANSSEN M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: areview [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2003, **93**(2):314-337
- [4] LE Quangbao, PARK S J, VLEK P L G. Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system [J]. Ecological Informatics, 2010, **5**(3):203-221
- [5] AERTS J C J H, EISINGER E, HEUVELINK G B M, et al. Using linear integer programming for multi-site land-use allocation [J]. Geographical Analysis, 2003, **35**(2):148-169
- [6] SADEGHI S H R, JALILI K, NIKKAMI D. Land use optimization in watershed scale [J]. Land Use Policy, 2009, **26**(2):186-193
- [7] INESSR, MARCOS B M, RAFAEL C M, et al. Algorithm based on simulated annealing for land-use allocation [J]. Computers & Geosciences, 2008, **34**(3):259-268
- [8] DUHJD, BROWN DG. Knowledge-informed Pareto simulated annealing for multi-objective spatial allocation [J]. Computers Environment & Urban Systems, 2007, **31**(3):253-281
- [9] 郭小燕,刘学录,王联国. 基于混合蛙跳算法的土地利用格局优化 [J]. 农业工程学报, 2015, **31**(24):281-288 [GUO Xiaoyan, LIU Xuelu, WANG Lianguo. Land use pattern optimization based on shuffled frog leaping algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, **31**(24):281-288]
- [10] 赵东娟,齐伟,赵胜亭,曲衍波. 基于GIS的山区县域土地利用格局优化研究 [J]. 农业工程学报, 2008, **24**(2):101-106 [ZHAO Dongjuan, QI Wei, ZHAO Shengting, et al. Landuse pattern optimization in mountainous areas at county level based on GIS [J]. Transactions of the CSAE, 2008, **24**(2):101-106]
- [11] 许泉立,杨昆,王桂林,等. 基于蚁群算法的洱海流域土地利用变化模拟 [J]. 农业工程学报, 2014, **30**(19):290-299 [XU Quanli, YANG Kun, WANG Guilin, et al. Simulation of land use change of Erhai Lake Basin based on ant colony optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, **30**(19):290-299]
- [12] 马世发,何建华,俞艳. 基于粒子群算法的城镇土地利用空间优化模型 [J]. 农业工程学报, 2010, **26**(9):321-326 [MA Shifa, HE Jianhua, YU Yan. Model of urban land-use spatial optimization based on particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2010, **26**(9):321-326]
- [13] 张鸿辉,曾永年,刘慧敏. 多目标土地利用空间优化配置模型及其应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(04):1056-1065 [ZHANG Honghui, ZENG Yongnian, LIU Huimin. Multi-objective spatial optimization model for land use allocation and its application [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, **42**(04):1056-1065]
- [14] 袁满,刘耀林. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置 [J]. 农业工程学报, 2014, **30**(1):191-199 [YUAN Man, LIU Yaolin. Land use optimization allocation based on multi-agent genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, **30**(1):191–199]
- [15] XU Q L, YANG K, WANG GL, et al. Agent-based modeling and simulations of land-use and land-cover change according to ant colony optimization: a case study of the Erhai Lake Basin, China [J]. Natural Hazards, 2015, **75**(1):95–118
- [16] DUANH B, WANG D B, ZHU J Q, et al. Development on ant colony algorithm theory and its application [J]. Control & Decision, 2004, **19**(12):1321–1320
- [17] 许方, 张桂珠. 一种改进的混合蛙跳和K均值结合的聚类算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, **49**(1):176–180 [XU Fang, ZHANG Guizhu. Clustering algorithm based on modified shuffled frog leaping algorithm and k-means[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, **49**(1):176–180]
- [18] EUSUFF M M, LANSEY K E. LANSEYK. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2003, **129**(3):210–225
- [19] SUN P, JIANG Z Q, WANG T T, et al. Research and application of parallel normal cloud mutation shuffled frog leaping algorithm in cascade reservoirs optimal operation [J]. Water Resources Management, 2016, **30**(3):1–17
- [20] JORDAAN J A, ZIVANOVIC R. Frequency estimation in power systems using the Dynamic Leapfrog method [J]. Measurement, 2006, **39**(5):451–457
- [21] ZHONG Q, XUE S, WANG Z, et al. Environmental and economic dispatch model for smart microgrid based on shuffled frog leap algorithm optimized by random nelder mead [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2016, **89**(3):147–151
- [22] HENSHALL P, PALMER P. A leapfrog algorithm for coupled conductive and radiative transient heat transfer in participating media [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, **47**(4):388–398
- [23] EUSUFF M, LANSEY K, PASHA F. Shuffled frog-leaping algorithm; a memetic meta-heuristic for discrete optimization [J]. Engineering Optimization, 2006, **38**(2):129–154
- [24] 武汉大学. 一种土地利用空间布局人工免疫优化模型的并行化方法: 201610424814.3[P]. 2016–12–11.
- [25] 张佰林, 杨庆媛, 鲁春阳, 等. 不同经济发展阶段区域土地利用变化及对经济发展的影响——以重庆市40个区县为例[J]. 经济地理, 2011, **31**(9):1539–1544 [ZHANG Bailin, YANG Qingyuan, LU Chunyang, et al. Effect on economic development of regional land use change in different development phase: forty counties in chongqing as the research object [J]. Economic Geography, 2011, **31**(9):1539–1544]
- [26] 王晓妹, 吴九兴. 区域土地集约利用程度及其时空差异研究——以安徽省11个地级市为样本[J]. 土壤通报, 2016, **47**(6):1294–1299 [WANG Xiaomei, WU Jiuxing. Analysis on regional land intensive utilization degree of regional land, and its temporal and spatial difference variation: taking the 11 prefecture—level cities in Anhui province as samples [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(6):1294–1299]
- [27] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. Frontiers in Ecology & the Environment, 2009, **7**(1):4–11
- [28] 谢莹, 匡鸿海, 吴晶晶, 等. 基于CLUE-S模型的重庆市渝北区土地利用变化动态模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(11):1729–1737 [XIE Ying, KUANG Honghai, WU Jingjing, et al. Dynamic simulation of land use change in yubei district of chongqing based on CLUE-S model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, **25**(11):1729–1737]
- [29] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海, 等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J]. 系统仿真学报, 2004, **16**(9):1871–1878 [LI Bohu, CHAI Xudong, ZHU Wenhui, et al. Some focusing points in development of modern modeling and simulation technology [J]. Journal of Systems Simulation, 2004, **16**(9):1871–1878]
- [30] 传俊, 黄红兵, 金士尧. 基于涌现视角的MAS信任模型仿真分析方法[J]. 计算机研究与发展, 2010, **47**(12):2090–2099 [CUAN Jun, HUANG Hongbing, JIN Shiyao. A simulation approach based on the notion of emergence for analyzing MAS trust model [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, **47**(12):2090–2099]

## Optimization of Land Use Spatial Pattern Based on Shuffled Frog Leaping Algorithm

HUANG Qiang, HUANG Hai\*, LIU Xue

(Department of geographic information and land resources, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In traditional models, there has been difficulty in effectively optimization of both quantity structure and spatial pattern for land use. This paper put forward a land use optimization model by Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA). This model was constructed based on geographic grid cells, with a head-to-tail sorting group method, intelligent learning and mutation operators were introduced to improve the algorithm, and the Yubei district

of Chongqing city was taken as a case study. The land use spatial pattern of study area in 2030 was optimized by the model, with its land use data in 2016. The value of ecosystem services in this region was  $2.012 \times 10^9$  Yuan before optimization, whereas the number increased to  $2.09^9 \times 10^9$  Yuan after the optimization. The gross economic output before and after optimization was  $1.263 \times 10^{11}$  Yuan and  $2.148 \times 10^{11}$  Yuan respectively. The land use intensity before and after optimization was 0.654 and 0.812 respectively. The growth rates of ecosystem services value, gross economic output and land use intensity were 4.3%, 70.1% and 26.3% respectively. The result showed that land use optimization model based on the SFLA could effectively optimize the quantity structure and spatial pattern of land use at the same time under several optimization objectives and restrictive factors. This method was proved to possess strong global optimization ability and fast convergence.

**Key words:** land use planning; Shuffled Frog Leaping Algorithm(SFLA); optimization of land use spatial pattern; Yubei district; Chongqing